

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.S1.006

钢箱-砼组合拱桥的拱轴线优化算法研究

宰国军¹, 周志祥²

(1. 重庆市市政设计研究院, 重庆 400020; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要:提出了一种新型钢箱-砼组合拱桥的最理想拱轴线的优化设计思想,分别给出了该类型拱桥拱顶区段和拱脚区段,以三次样条曲线推导拱轴线的公式,建立了拱轴线优化的线性规划数学模型,应用线性规划的改进单纯形法,开发出该类型拱桥的拱轴线优化设计程序。万盛藻渡大桥主拱拱轴线算例研究表明,笔者提出的拱轴线优化算法具有较高的精度和计算效率。

关键词:组合拱桥;拱轴线;优化设计;线性规划;改进单纯形法

中图分类号:U 442.5 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)S1-0020-04

Optimization Algorithm Research on the Arch Axis of Steel Box-Concrete Composite Arch Bridge

Zai Guojun¹, Zhou Zhixiang²

(1. Chongqing Municipal Designing Research Institute, Chongqing 400020, P. R. China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: The paper proposed an innovative optimized design philosophy of the optimal arch axis of steel box-concrete arch bridge. Formulas to calculate the arch axis at the arch crown and the arch springing of this type of arch bridge were respectively derived with cubic spline curve. A linear programming mathematics model to optimize the arch axis was built. By utilizing the improved simplex method of linear programming, an optimization design program for this type of arch bridge was developed. The case study, the arch axis calculation of Wan-sheng Zao-du Bridge, shows that the optimization algorithm of arch axis proposed in this paper can provide high precision and computational efficiency.

Key words: composite arch bridge; arch axis; optimization design; linear programming; improved simplex method

针对我国西南山岭重丘区山高谷深、U形和V形河谷众多的特定地形、地质条件,周志祥教授^[1]于2007年提出了一种新型钢箱-混凝土组合拱桥及放张式自上而下竖转施工技术,能够将合龙成拱时间由数天缩短至几小时,极大地缩短施工风险期^[2];根据拱结构的受力特点,将钢材和混凝土这

两种建筑材料有效组合,充分发挥了两者的力学性能^[3-4]。目前,该技术于已成功应用于三座试点桥梁(遂宁界福路人行天桥:净跨径40 m,万盛藻渡大桥:净跨径75 m,重庆市夹滩笋溪河大桥:净跨径100 m),并取得很好的社会经济效益^[4]。

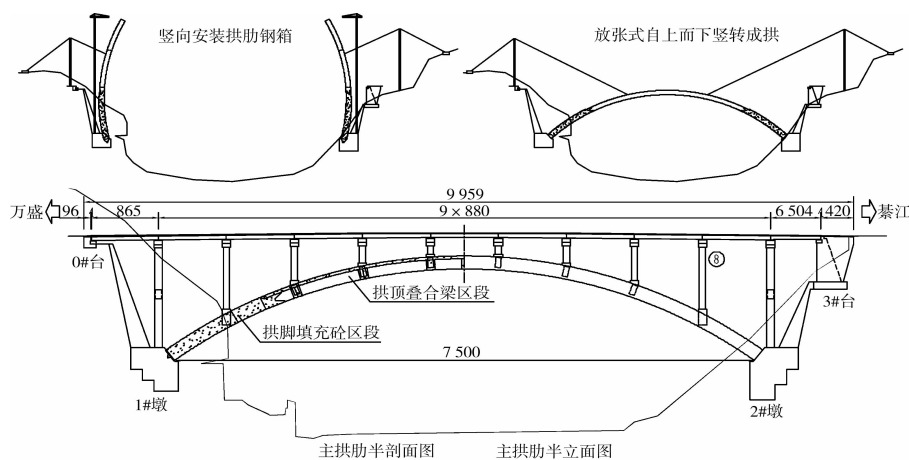


图1 万盛藻渡大桥施工工艺及总体布置(单位:cm)

收稿日期:2014-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50578168);交通部西部交通建设项目(200631881448)

作者简介:宰国军(1982-),男,硕士生,主要从事桥梁结构研究,(E-mail)zgj82@163.com。

周志祥(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事桥梁结构行为及新技术研究,(E-mail)zhixiangzhou@cquc.edu.cn。

对于这种新型拱桥,结构尺寸的拟定和拱轴线的确定是设计的关键点,前者在文献^[5]中已取得初步研究成果。确定拱轴线是拱桥设计的重点,最理想拱轴线应与所受荷载组合的压力线相吻合,这时主拱截面上只有轴向压力,而无弯矩和剪力作用^[6]。但实际上是不可能获得最理想拱轴线,因为主拱受到多种可变荷载作用,当恒载压力线与拱轴线吻合时,仅在活载作用下的压力线与拱轴线就不再吻合了。根据大跨径拱桥恒载内力大的特点,一般以趋近恒载压力线的拱轴线作为理想拱轴线。理想拱轴线确定的常规方法是通过“五点重合”的试算法确定^[7],本文阐述了一种以三次样条插值函数作为拱轴线逼近恒载压力线函数,应用线性规划理论^[8],对这种新型拱桥的拱轴线进行优化设计的研究方法。

1 新型拱桥主拱肋的特点

拱桥在荷载作用下,一般在拱顶区段有正弯矩,而拱脚区段轴力较大。针对此受力特点,将拱桥的截面做成图 2 的形式。

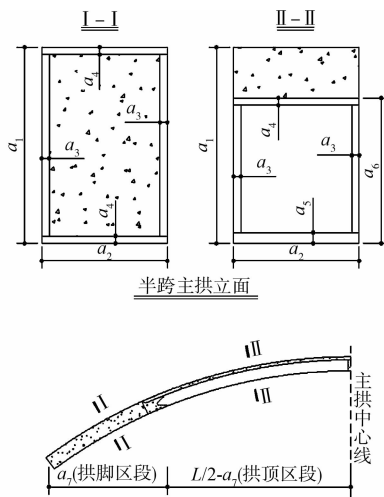


图 2 钢箱-砼组合拱桥截面形式

由上图可知,这种新型钢箱-混凝土组合拱桥的拱脚区段拱肋采用钢箱内填充砼的截面形式,钢箱对核心混凝土的套箍作用进一步提高了混凝土的抗压强度,混凝土对钢箱起到约束加劲作用,防止钢板局部失稳;拱顶区段拱肋采用叠合箱梁的截面形式,这样它的抗弯性能得到加强,但混凝土收缩徐变在拱顶区段产生的负弯矩,在混凝土截面产生拉应力,对截面受力不利;两者之间采取构造形式将其过渡,轴线是分段连续的,在过渡段有转折,该类型拱桥的拱轴线已与常规拱桥的拱轴线不同。因此,对其进行拱轴线的优化设计亦不能按常规方法。根据该拱肋的截面特征、拱轴线特点及受力特性,笔者提出了在拱顶区段预留向上的合理偏心距,在拱脚区段采用拱轴线逼近压力线的优化设计思想。

2 优化数学模型的建立

文献^[8]以三次样条曲线:

$$f(x_i) = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ A_0 x_i^2 + \sum_{j=0}^{i-1} A_{j+1} (x_i - x_j)^3 & 1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (2.1)$$

作为拱轴线逼近压力线 y_i , 给出的常规拱桥的拱轴线优化数学模型:

LP: $\lambda \rightarrow \min$

$$\begin{aligned} -A_0 - 3 \sum_{j=0}^{i-1} (x_i - x_j) A_{j+1} &\leq 0 & 1 \leq i \leq n \\ x_i^2 A_0 + \sum_{j=0}^{i-1} (x_i - x_j)^3 A_{j+1} - \lambda &\leq y_i & 1 \leq i \leq n \\ -x_i^2 A_0 - \sum_{j=0}^{i-1} (x_i - x_j)^3 A_{j+1} - \lambda &\leq -y_i & 1 \leq i \leq n \end{aligned} \quad (2.2)$$

式中: $\lambda \geq 0, A_0 \geq 0, A_1, A_2, \dots, A_n$ 为实数是设计变量。

根据本文提出钢箱-砼组合拱桥优化设计思想,将拱脚区段的拱轴线改为:

$$f(x_i) = A_0 x_i^2 + \sum_{j=0}^{i-1} A_{j+1} (x_i - x_j)^3 + \Delta_c / \cos \phi_i \quad m < i \leq n \quad (2.3)$$

式中: Δ_c 是拱顶区段拱肋与拱脚区段重心的差值, ϕ_i 为各节点的倾角。

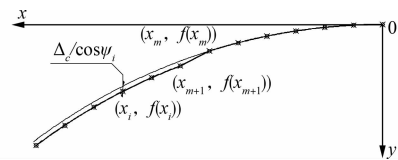


图 3 钢箱-砼组合拱桥拱轴线

根据本文提出钢箱-砼组合拱桥优化设计思想,将拱顶区段的压力线改为:

$$y'_i = y_i - e / \cos \phi \quad 1 \leq i \leq m \quad (2.4)$$

式中: e 为拱顶区段合理偏心距。

将式(2.3)及(2.4)代入式(2.2)得钢箱-砼组合拱的拱轴线优化数学模型:

LP: $\lambda \rightarrow \min$

$$\begin{aligned} -A_0 - 3 \sum_{j=0}^{i-1} (x_i - x_j) A_{j+1} &\leq 0 & 1 \leq i \leq n \\ \begin{cases} x_i^2 A_0 + \sum_{j=0}^{i-1} (x_i - x_j)^3 A_{j+1} - \lambda \leq \\ y_i - e_i / \cos \phi_i \\ -x_i^2 A_0 - \sum_{j=0}^{i-1} (x_i - x_j)^3 A_{j+1} - \lambda \leq \\ -(y_i - e_i / \cos \phi_i) \end{cases} & & 0 \leq i \leq m \\ \begin{cases} x_i^2 A_0 + \sum_{j=0}^{i-1} (x_i - x_j)^3 A_{j+1} - \lambda \leq \\ y_i - \Delta_c / \cos \phi_i \\ -x_i^2 A_0 - \sum_{j=0}^{i-1} (x_i - x_j)^3 A_{j+1} - \lambda \leq \\ -(y_i - \Delta_c / \cos \phi_i) \end{cases} & & m+1 \leq i \leq n \end{aligned} \quad (2.5)$$

其中 $\lambda \geq 0, A_0 \geq 0, A_1, A_2, \dots, A_n$ 为实数是设计变量。显然,这是一个线性规划(以下简称 LP)问题。

3 线性规划的改进单纯形法

LP 问题可通过椭球法、投影尺度法及内点算法等简便实用的方法求解,笔者选择了有利于编程的改进单纯形算法^[7]。设已知 LP 问题的一个基可行基 $\mathbf{B} = (p_1, p_2, \dots,$

p_{jm}) 和 B^{-1} , 并算出 $x_B = B^{-1}b = (b_{10}, b_{20}, \dots, b_{m0})^T$ 。则改进单纯形法的步骤为:

步骤 1 计算向量 $\pi = c_B B^{-1}$ (称 π 为对应于基 B 的单纯形乘子向量)。

步骤 2 按下标顺序依次计算检验数 $\lambda_j = \pi p_j - c_j$ 。若所有 $\lambda_j \leq 0$, 则终止计算, B 为最优基; 否则, 确定 $r = \min\{j | \lambda_j > 0\}$, 转入下一步。

步骤 3 计算 $B^{-1}p_r = (b_{1r}, b_{2r}, \dots, b_{mr})^T$, 若 $B^{-1}p_r \leq 0$, 终止计算, 问题无最优解; 否则, 转入下一步。

步骤 4 求出 $j_s = \min\left\{j_r \mid \frac{b_{j_0}}{b_{j_r}} = \min\left\{\frac{b_{j_0}}{b_{j_r}}\right\}_{b_{j_r} > 0}\right\}$ 及对应行标 s 。从而得到新基 $\bar{B} = (p_{j_1}, \dots, p_{j_{s-1}}, p_r, p_{j_{s+1}}, \dots, p_{j_m})$ 接下一步。

步骤 5 把单位矩阵 I_m 的第 s 列换成 $(-\frac{b_{1r}}{b_{sr}}, \dots, -\frac{b_{s-1,r}}{b_{sr}}, \frac{1}{b_{sr}}, -\frac{b_{s+1,r}}{b_{sr}}, \dots, -\frac{b_{mr}}{b_{sr}})^T$, 便得出 E_{sr} , 接下一步。

步骤 6 计算 $\bar{B}^{-1} = E_{sr} B^{-1}$, $x_{\bar{B}} = E_{sr} x_B$ 然后用 $\bar{B}, \bar{B}^{-1}, x_{\bar{B}}$ 分别代替 B, B^{-1}, x_B , 返回步骤 1。

改进单纯形法的程序流程图见图 4。

4 拱轴线优化程序及算例

笔者根据改进单纯形法, 运用 Visual C++ 6.0, 编制了求解 LP 问题程序, 并试算了一些 LP 问题, 验证了它的正确性。本文式(2.5)的 LP 问题的求解需要知道拱肋的压力线 y_i , 笔者编制了钢箱-砼组合拱桥的结构计算程序, 将它与改进单纯形法的程序整合, 从而开发出钢箱-砼组合拱桥的拱轴线优化设计程序。

依托万盛藻渡大桥, 进行拱轴线优化设计, 原设计该桥

主拱净跨径 $l_0 = 75$ m, 净矢高 $f_0 = 12.5$, 采用悬链线作为拱轴线, 拱轴系数 $m = 1.756$ 。拱肋钢箱采用 Q345 钢材, 拱顶区段箱顶混凝土采用 C55, 拱脚区段箱顶混凝土采用 C40, 拱肋结构布置见图 2, 截面尺寸参数值见表 1。拱肋上等间距布置 8 个立柱, 立柱截面宽 1 m, 高 1.1 m, 采用 C30 混凝土, 桥面系采用简支梁, 桥型总体布置见图 1。

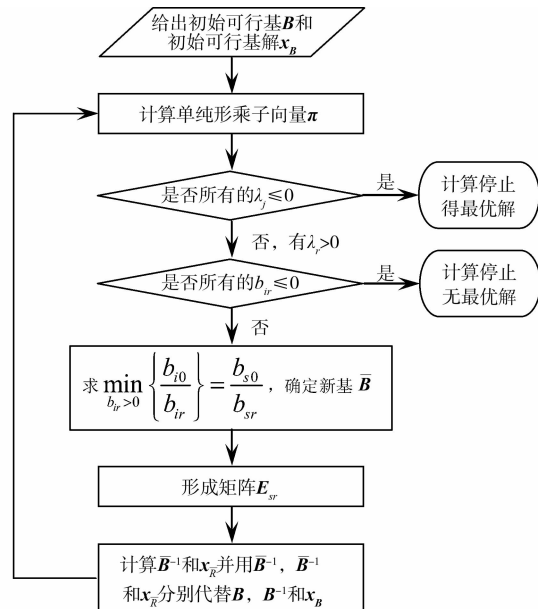


图 4 线性规划的改进单纯形法流程图

优化设计前的该拱桥拱轴线是悬链线, 经优化拱轴线变成三次样条曲线, 0~8 号节点之间为拱顶区段, 8~9 号节点之间为过渡段, 9~12 号节点之间为拱脚区段。

表 1 钢箱-砼组合拱桥的拱肋截面参数

单位: m

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
1.9	1.1	0.008	0.008	0.019	1.4	11.1

表 2 拱轴线优化设计前后坐标表

单位: m

节点号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X_{前}$ 坐标	0.000	3.172	6.344	9.516	12.688	15.861	19.033	22.205	25.377	28.549	31.721	34.893	38.065
$Y_{前}$ 坐标	0.000	0.078	0.315	0.711	1.270	1.999	2.903	3.991	5.273	7.107	8.826	10.783	12.995
$X_{后}$ 坐标	0.000	3.172	6.344	9.516	12.689	15.861	19.033	22.205	25.377	28.549	31.722	34.894	38.066
$Y_{后}$ 坐标	0.000	0.156	0.405	0.789	1.333	2.055	2.935	3.995	5.434	7.333	8.911	10.812	13.049
$X_{后} - X_{前}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.001
$Y_{后} - Y_{前}$	0.000	0.077	0.090	0.078	0.062	0.057	0.032	0.004	0.161	0.225	0.085	0.029	0.054

注: $X_{前}$ 、 $X_{后}$ 分别为优化设计前后的横向坐标; $Y_{前}$ 、 $Y_{后}$ 分别为优化设计前后的竖向坐标。

由表 2 可知, 优化设计后, 拱轴线的计算跨径及各点横向坐标基本没变, 计算矢高 13.049 m 比优化设计前的 12.995 m 增加了 54 mm, 除 0 号节点外, 各节点竖向坐标均比优化前有所增加, 其中 8 号、9 号节点竖向坐标比优化前增加幅度较大, 分别增加了 161 mm 和 225 mm。由此可推断,

拱轴线优化设计不仅改善了拱肋的拱顶区段和拱脚区段受力情况, 同时也能大幅改善过渡段的受力情况。

钢箱-砼组合拱桥拱轴线的优化目的是使得拱顶区段拱肋拱轴线预留向上的合理偏心距, 拱脚区段的拱轴线逼近恒载压力线。

表 3 拱轴线优化设计前后恒载内力表

单位: kN·m

节点号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
轴力 _前	7 297.9	7 291.7	7 367.7	7 383.6	7 387.0	7 619.7	7 643.5	8 011.8	8 057.2	7 992.8	8 610.5	8 728.0	8 839.9
弯矩 _前	141.6	626.3	185.2	-269.9	88.8	-1 155.0	-1 413.6	-1 129.1	-2 740.0	-256.3	-23.9	-1 689.8	-1873.0
轴力 _后	7 295.4	7 286.0	7 365.0	7 381.1	7 385.8	7 617.8	7 641.3	8 019.4	8 057.8	7 995.3	8 589.2	8 725.0	8 836.7
弯矩 _后	266.1	780.0	428.6	-127.4	101.1	-1 206.3	-1 669.3	-2 080.3	-2 101.5	814.6	0.9	-1 532.9	-1 781.8

注:轴力_前、轴力_后分别为优化设计前后的轴力;弯矩_前、弯矩_后分别为优化设计前后的弯矩。

由表 3 知,优化设计前后拱肋轴力基本不变,但弯矩变化较明显。结合图 5 分析,拱顶区段(0~2 号节点)的正弯矩比优化前增加 124.6~243.4 kN,增加比例为 88%~131%,说明该区段向上的预留偏心增加了;拱脚区段(10~12 号节点)的负弯矩比优化前减小 91.2~156.9 kN,减小比例为 5%~9%,说明该区段的拱轴线向压力线逼近了;过渡段 8 号和 9 号节点弯矩绝对值比优化前分别减少 638.5 kN 和 1 070.9 kN,说明该区段的拱轴线向压力线逼近的幅度更大。总体来说,拱轴线优化设计基本达到优化目标,较好地改善了主拱肋受力状况。

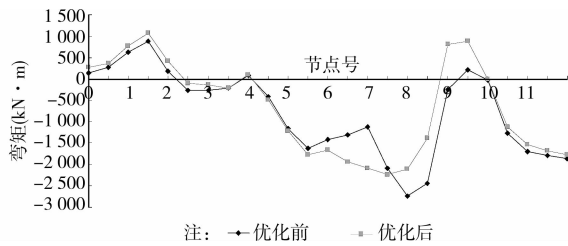


图 5 拱轴线优化设计前后恒载产生的弯矩图

5 结 语

1) 针对新型的钢箱-砼组合拱桥,根据该桥拱肋的截面特征、拱轴线特点及受力特性,本文提出了在拱顶区段预留向上的合理偏心距,在拱脚区段采用拱轴线逼近压力线的优化设计思想。

2) 根据钢箱-砼组合拱桥拱轴线的优化设计思想,分别推导了拱顶区段和拱脚区段,以三次样条曲线建立的拱轴线公式,进而建立了该桥拱轴线优化的线性规划数学模型。

3) 应用线性规划的改进单纯形法,开发了这种新型拱桥的拱轴线优化程序,依托工程实例进行拱轴线的优化设计,结果表明,本文提出的优化设计思想和算法,使得这种新型拱桥的拱肋受力状况得到了较大的改善。

参考文献:

- [1] 周志祥. 一种竖转钢-混凝土组合拱桥[P]. 中国:发明专利申请号,200710048919.8,2007.10.
- [2] 朱世峰,周志祥. 钢-混凝土组合拱桥竖转施工体系研究[J]. 施工技术,2009,38(7): 64-68.
- [3] 宰国军. 竖转钢-砼组合拱桥结构优化研究[D]. 重庆交通大学,2008.
- [4] 范亮. 钢箱-混凝土组合拱截面受力行为与设计原理研究[D]. 西南交通大学,2010.
- [5] 宰国军,周志祥,朱世峰,等. 基于改进遗传算法的组合拱桥结构优化设计[J]. 公路,2010,3:48-51.
- [6] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [7] 张干宗. 线性规划[M]. 2版. 武汉:武汉大学出版社,2004.
- [8] 李志文. 最优化原理与方法[M]. 北京:冶金工业出版社,1983.

(编辑 罗 敏)